

# 基于短时强降雨探测的拉曼激光雷达测温数据 WRF 同化方法

李 博<sup>1,2</sup>, 普亚洲<sup>1</sup>, 王 楠<sup>3</sup>, 王玉峰<sup>1</sup>, 狄慧鸽<sup>1</sup>, 宋跃辉<sup>1</sup>, 华灯鑫<sup>1\*</sup>

1. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048
2. 中国气象局广州热带海洋气象研究所/广东省区域数值天气预报重点实验室, 广东 广州 510080
3. 陕西省气象台, 陕西 西安 710014

**摘 要** 为挖掘激光雷达高垂直分辨探测优势, 将其引入降雨观测与研究中, 重点构建一套测温数据模式同化方法, 目的在于评估激光雷达数据对降雨模拟的影响。借助激光雷达测温数据综合多级质量控制技术对雨前探测信号进行反演优化, 获取更可靠的温度廓线, 这种垂直间隔 4 m 左右的雷达数据对于降雨是一种新型数据。设计三步实验研究新数据 WRF 模式(weather research and forecasting model)同化方法。第一步开展控制实验, 通过模式检验与参数调试获取最佳模拟方案, 为同化实验提供依据。第二步开展常规探测数据同化实验, 通过 WRF 模式同化模块将 90 组地面、高空测站数据融入模式初始场, TS 评分提高了 0.07, 并成功消除了陕西西南部虚假暴雨中心, 但存在空报率偏高等问题。第三步开展激光雷达数据同化实验, 重点解决制约模式初始场中尺度信息测站稀少的关键难题, 引入 MQ 法将单点数据扩展为 49 组格点数据并完成三维变分同化模拟, 克服了常规数据同化所致空报率偏高的问题, 且模拟雨强更接近实况, 同时降水 TS 评分提高了 0.12, 漏报率降低了 0.09。定性定量分析均表明借助 Multiquadric 将激光雷达探测数据融入 WRF 模式可造成模拟效果提升。本文结果表明激光雷达可用于探测短时强降雨, 且探测位置宜设在对流云外围。

**关键词** 激光雷达测温; 短时强降雨; Multiquadric 算法

**中图分类号:** TN958.98 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)07-2110-06

## 引 言

理论研究与应用均表明预报准确率的提高关键取决于数值模式产品<sup>[1]</sup>。长期以来学者们致力于向模式融入各种数据, 以获取更逼真的初始场。不同数据的融合方法不尽相同<sup>[2]</sup>: 早先不少学者借助 Xue 等<sup>[3]</sup>研发的 ARPS 模式(advanced regional prediction system)ADAS 模块(ARPS data analysis system)开展同化; 随着 WRF(weather research and forecasting model)变分同化技术日渐成熟, 当前已形成了自身同化模块 WRFDA(WRF data assimilation system)。业务应用方面, 近年国内气象台通过不同方案陆续建成了快速更新同化预报系统, 可同化常规、卫星、微波雷达等多源数据: 北京台、陕西台采用 WRF-3DVAR(three-dimensional variation data assimilation)变分<sup>[4]</sup>, 广东台采用 GRAPES(global/

regional assimilation and prediction enhanced system)-3DVAR 变分<sup>[5]</sup>, 上海台采用 ARPS-ADAS-WRF 融合技术<sup>[6]</sup>。纵观当前用于模式同化的多源数据, 普遍存在垂直分辨率不高的问题, 极大限制了研究精细程度。这种理论上的“摸不透”会造成业务上的“报不准”<sup>[7]</sup>, 是学者们共同面临的难题。为此各国专门开展加密探测试验, 但也只是做到几十层左右(数百米)的垂直分辨率<sup>[8]</sup>。

针对上述问题, 本文尝试引入一类新数据: 激光雷达测温数据。相比于现有探测手段, 这类新探测数据具有极高的垂直分辨率<sup>[9]</sup>。当前国内外不少单位均研制了其探测反演技术, 其中包括西安理工大学设计的转动拉曼激光雷达系统<sup>[10]</sup>。该团队还配套研发了激光雷达测温数据质控技术<sup>[11]</sup>, 提出以 10 方程对探测信号进行标定反演的新算法, 其反演误差比传统算法小 2 K 以上。基于这些前期工作, 引入激光雷达开展短时强降雨探测, 重点探讨测温数据的 WRF 同化

收稿日期: 2019-04-02, 修订日期: 2019-10-14

基金项目: 中国气象局/广东省区域数值天气预报重点实验室开放基金项目(J202002), 中国科学院战略性先导科技专项(XDA23090102), 国家自然科学基金项目(41627807, 61575160, 41575027)资助

作者简介: 李 博, 1979 年生, 西安理工大学机械与精密仪器工程学院博士后 e-mail: doctorlee@xaut.edu.cn

\* 通讯作者 e-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn

方法, 并评估激光雷达探测数据对模式计算产生的独特改进效果。

### 1 实验部分

#### 1.1 激光雷达短时强降雨探测

降雨发生于世界时 2015 年 7 月 20 日 06 时—18 时: 激光雷达站降雨 12 时消失, 周边降雨 18 时消失。自 2015 年 7 月 20 日 06 时始, 有一簇带来强降雨的对流云团由南向北移动, 于 12 时过境西安理工大学[图 1(a)], 降雨随后停止、探测实验即开展。图 1(a)微波雷达(小十字丝)探测到该云团南

北尺度约 20 km、东西尺度约 50 km(虚线方框所示阴影回波区), 此时激光雷达测站(小圆球)位于其南部边缘。图 1(b)为探测信号反演的对流云南部温度廓线。之前研究<sup>[11]</sup>已表明可用 FNL(The National Centers for Environmental Prediction Final operational global analysis data)温度为标准检测雷达测温。由图 1(b)可见, 实验探测到了对流云南部边缘[图 1(a), 小圆球]温度廓线, 因为北侧对流云(填色区)仍在降雨, 所以雷达有效探测高度不高, 其中 2 800 m 以下(A 段数据)及 3 500~4 000 m(B 段数据)探测效果较好。由质控技术定量分析, A 和 B 两段数据相似高度(2.6 K)与均方根误差差(3.1 K)均小于各级质控标准, 因此符合质控检验要求。

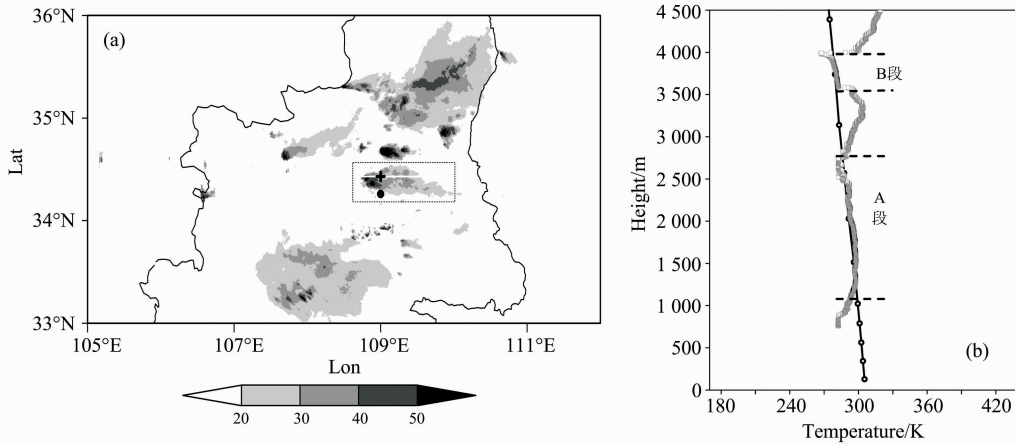


图 1 (a)2015 年 7 月 20 日 12 时微波雷达探测回波(填色区), 单位: dBz, 小十字丝表示微波雷达探测位置, 虚线方框表示影响西安的对流云团, 小圆球为激光雷达测站位置; (b)同日 12 时激光雷达探测大气温度廓线(密集灰色小方框)、及其与 FNL 标准温度(黑色空心圆)对比, 单位: K

Fig. 1 (a) The microwave radar echo (shaded, unit: dBz), the black cross represents the location of the microwave radar, the dashed pane is the convective cloud influenced Xi'an, and the black dot is the location of lidar; (b) The atmospheric temperature profile (densely gray pane) detected by lidar, and the FNL temperature profile (black circle) in Xi'an at 1200 UTC 20 July 2015, unit: K

#### 1.2 MQ-WRF 同化方法

考虑到单站数据对模式初始场信息贡献较小, 引入 Multiquadric(简称 MQ)对激光雷达数据进行重构扩展, 以获取更多模式同化用的数据。MQ 是一种经典的径向基函数插值法<sup>[12]</sup>, 已有研究表明其分析结果能达到与统计插值相同级别的精度与协调度, 且该方法对数据稀疏地区有较好的处理效果<sup>[13]</sup>。图 2 给出了 MQ 不规则探测点(圆点)、规则参考格点(三角)、及规则待插值格点(经纬网格线交汇)。MQ 函数公式为:

$$H(X) = \sum_{i=1}^N \alpha_i Q(X - X_i) \quad (1)$$

式(1)中, 假设所求变量场为  $H(X)$ ,  $X$  是三维位置矢量,  $Q(X - X_i)$  为径向基函数, 表示已知探测点(不规则)  $X_i$  与任意点(规则)  $X$  之间的距离矢量,  $\alpha_i$  为探测点权重系数,  $i$  表示序号。考虑径向基函数是二维双曲面函数, 则式(1)可演化为

$$Q_i(x, y) = - \left( \frac{|x - x_i|^2 + |y - y_i|^2}{c^2} + 1.0 \right)^{1/2} \quad (2)$$

式(2)中  $c$  为自由参数, 可取一小值常数。 $(x, y)$  和  $(x_i, y_i)$  分别为东西、南北位置变量。

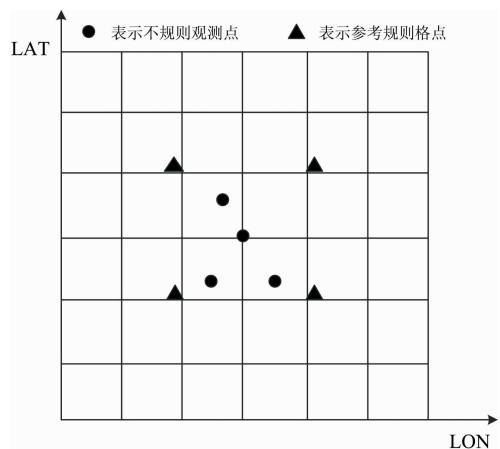


图 2 MQ 算法中的探测点、参考格点及插值格点

Fig. 2 The detecting points, referencing points, and interpolating points in the MQ method

图 3MQ-WRF 同化方案包含四步关键技术。第一，在探测点周围任取  $i$  个参考点，根据式(2)任取一小值  $c$ ，可分别求取这些参考点与探测点间的距离矢量  $Q_i$ 。第二，求取参考点与探测点间的权重系数  $\alpha_i$ ：将式(1)写成矩阵形式

$$H_j = Q_{ij}\alpha_i \quad (3)$$

对式(3)求逆变换

$$\alpha_i = Q^{-1} H_j \quad (4)$$

依据式(4)可求  $\alpha_i$ 。第三，选取最优参数  $c$ ：保留参考点、

不考虑探测点，重设与参考点数目相等的规则网格点；重复第一步，分别求取网格点与参考点间的距离矢量  $Q$ ；根据式(3)求取网格点的温度值  $H$ ；以网格点已知温度值为标准，求取与  $c$  值一一对应的 RMSE 值；分别设定  $m$  组  $c$  值，并求取与之对应的  $m$  组 RMSE 值；从  $m$  组 RMSE 中选取最小 RMSE 所对应的  $c$  值，即为最优  $c$  值。第四，由最优  $c$  值求取待插值格点与参考点位置矢量关系  $Q$ ，根据式(3)求取待插值网格点(重构后的  $m$  组)温度，并耦合 WRF 开展同化。

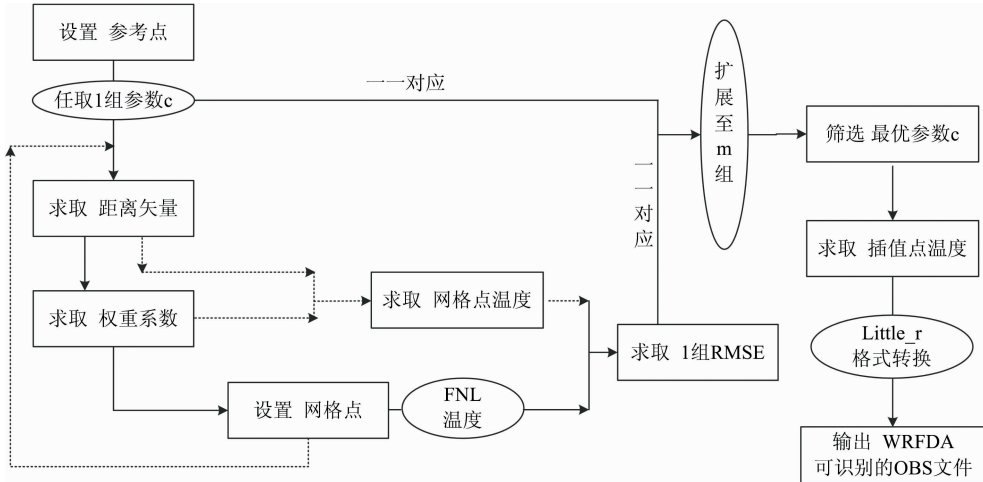


图 3 MQ-WRF 耦合流程

Fig. 3 Flow chart for the coupling of MQ and WRF

## 2 结果与讨论

### 2.1 激光雷达单组测站数据的重构与扩充

以激光雷达测站为基础，参考陕西省现有 3 个探空站(延安、安康、汉中)共计 4 站作为不规则点开展重构。MQ 关键在于选取最优参数  $c$  值，此处将  $c$  取值范围设为

0.000 1~100。图 4 给出了其中两层有效对等高度层上  $c$  值对应的 RMSE，1 530 m 最优  $c$  值为 10，3 710 m 最优  $c$  值为 1，由此可插值更接近实况的格点温度(图 5)：所插值的 49 组格点以西安为中心向四周辐射，与原有的 4 个已知站相比，它们较密集地覆盖了关中与陕南地区，有效丰富了模式初始场中尺度信息；49 组格点数据连续性较好，各高度层温度阈值分别为 293.4~296.5 和 279.9~284.6 K。

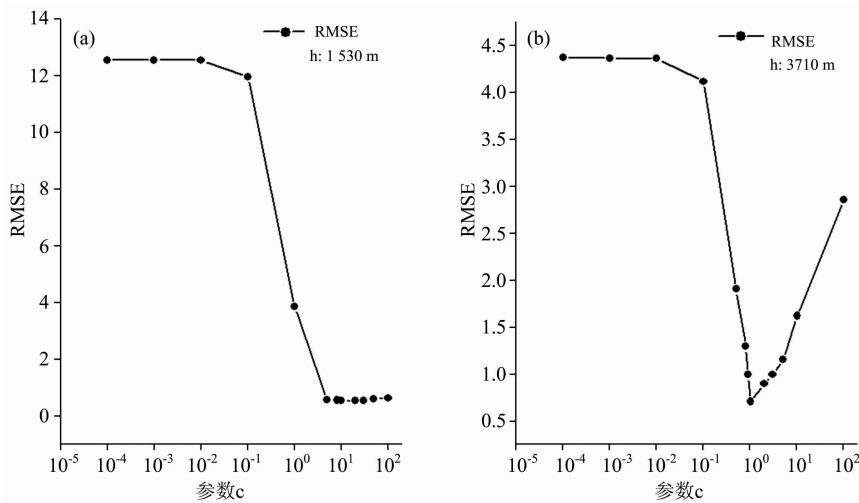


图 4 不同高度层参数  $c$  与 RMSE 关系

(a): 1 530 m; (b): 3 710 m

Fig. 4 The relationship between the RMSE and  $c$

(a): 1 530 m; (b): 3 710 m

### 2.2 同化效果定性、定量评估

根据 1.2 节方案开展 49 组温度数据同化, 时间为 12 时—18 时, 在 2 800 m 高度以下及 3 500~4 000 m 高度间选取雷达探测高度与 FNL 数据有效对等高度层。图 6 给出了

实况降雨与不同方案模拟雨量的定性对比, 其中常规数据同化实验(90 组地面、高空测站)记为一次同化, 激光雷达数据(49 组)同化实验记为二次同化。由图 6(a)可见, 实际观测的主雨区(实线框)位于陕西省南部, 区域降雨强度超过 10 mm

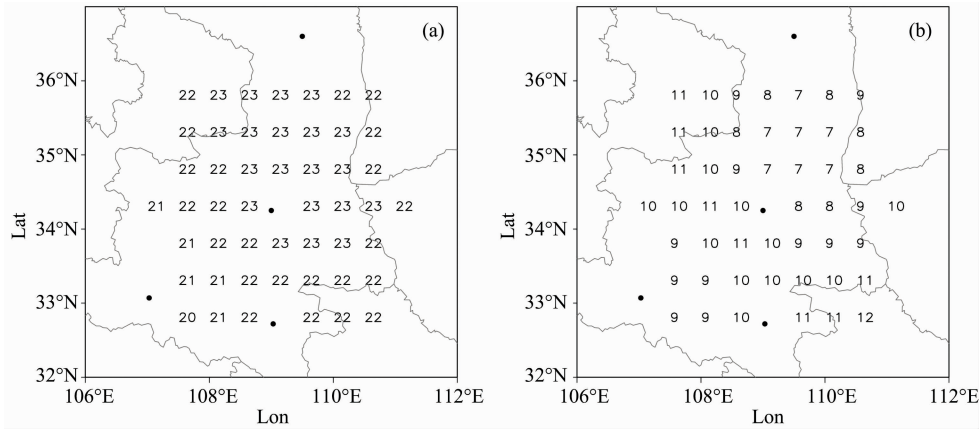


图 5 1 530 m(a)与 3 710 m(b)高度 49 组插值格点与插值结果

黑色圆点代表已知探空点, 单位: °C

Fig. 5 The temperature distribution on the 49 groups of interpolated grids at 1 530 m (a) and 3 710 m (b)

The black dots represent irregular observations, unit: °C

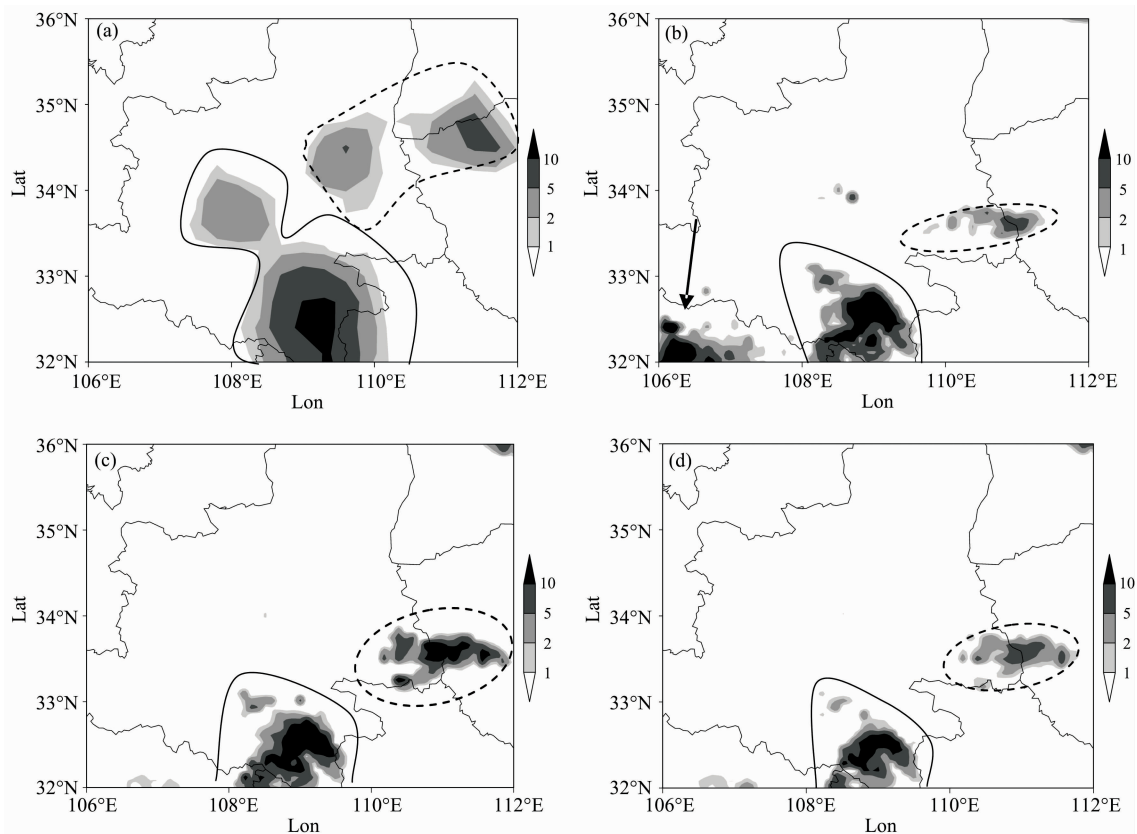


图 6 同化前后 2015 年 7 月 20 日 12 时—18 时雨量(单位: 毫米)模拟效果定性分析

(a): 实况; (b): 同化前控制实验模拟; (c): 同化常规数据后模拟; (d): 同化激光雷达数据后模拟

实线框表示主雨区, 虚线框表示副雨区, 箭头表示虚假雨区

Fig. 6 Qualitative comparison of rainfall during 1200 UTC—1800 UTC 20 July 2015, unit: mm

(a): Observation precipitation; (b): CTRL Simulation precipitation before assimilating; (c): Simulation precipitation after assimilating the ground and sounding data; (d): Simulation precipitation after assimilating the lidar data

6 h<sup>-1</sup>, 同时在陕西—山西—河南三省交界处有一片副雨区(虚线框), 雨强介于 5~10 mm 6 h<sup>-1</sup>。控制实验[不同化任何数据, 图 6(b)]主雨区被成功模拟出, 且位置吻合较好、雨强超过 10 mm 6 h<sup>-1</sup>, 但控制实验模拟出了一块虚假雨区[图 6(b), 箭头], 雨强超过 10 mm 6 h<sup>-1</sup>。一次同化后[图 6(c)]虚假雨区被消除, 且副雨区(虚线框)降雨范围增大、更接近实况。二次同化后[图 6(d)], 相比控制实验模拟雨量[图 6(b)]有明显改善, 即使与一次同化模拟雨量[图 6(c)]相比, 模拟效果也有改进, 特别是主雨区和副雨区降雨强度均减小, 副雨区雨强降至 10 mm 以内, 更接近实况。

选取西安周边 35 个降雨测站计算<sup>[14]</sup>雨量模拟的定量分析指标(表 1)。综合评判小-中雨级别(0.1~5 mm 6 h<sup>-1</sup>)模拟效果: 一次同化后最明显的改善是漏报率降低了 0.09, 这与图 6(c)虚假雨区的消除相吻合, TS 评分提高了 0.07, 不足之处在于空报率有所抬升(0.04); 二次同化后效果进一步提升, 一方面, 与未同化任何探测数据相比(表 1“一次同化前”与“二次同化后”)各项指标得到全面优化, TS 评分提高了 0.12, 空报率降低了 0.04, 漏报率降低了 0.09, 另一方面, 即使与一次同化相比(表 1“二次同化效果”)模拟效果也得到进一步改善, 有效克服了一次同化所致空报率过高的问题, 空报率减小了 0.08, 这与模拟降雨强度减小一致, 同时 TS 评分进一步增加了 0.05, 达到 0.71。通过分析激光雷达数据对模拟效果改进原因表明, 雷达廓线对同高度段内模式信息提供了更精细的垂直结构, 加入雷达数据后温、风、湿在对流层中低层[对应于图 1(b)中 A、B 两段]均发生了显著改变。

## References

- [1] Wang Nan. Meteorological and Environmental Research, 2010, 4: 56.
- [2] TANG Xi-ba, PING Fan, LUO Zhe-xian(唐细坝, 平凡, 罗哲贤). Chinese Journal of Geophysics(地球物理学报), 2016, 59(1): 45.
- [3] Xue M, Martin W J. Mon. Wea. Rev., 2006, 134: 149.
- [4] FAN Shui-yong, CHEN Min, ZHONG Qi-qin(范水勇, 陈敏, 钟跻芹). Torrential Rain and Disasters(暴雨灾害), 2009, 28(2): 119.
- [5] CHEN Zi-tong, HUANG Yan-yan, WAN Qi-lin(陈子通, 黄燕燕, 万齐林). Journal of Tropical Meteorology(热带气象学报), 2010, 26(1): 49.
- [6] CHEN Bao-de, WANG Xiao-feng, LI Hong(陈葆德, 王晓峰, 李泓). Advances in Meteorological Science and Technology(气象科技进展), 2013, 3(2): 29.
- [7] DU Qi-cheng, QIU Xue-xing, LIU Yu-lu(杜其成, 邱学兴, 刘裕禄). Meteorological and Environmental Sciences(气象与环境科学), 2014, 37(4): 50.
- [8] NI Yun-qi, ZHOU Xiu-ji, ZHANG Ren-he(倪允琪, 周秀骥, 张人禾). Journal of Applied Meteorological Science(应用气象学报), 2006, 17(6): 690.
- [9] LIU Yu-li, XIE Chen-bo, SHANG Zhen, et al. Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2016, 36(6): 1978.
- [10] WANG Yu-feng, GAO Fei, ZHU Cheng-xuan(王玉峰, 高飞, 朱承炫). Acta Optica Sinica(光学学报), 2015, 35(3): 0328004.
- [11] LI Bo, HUA Deng-xin, ZHOU Yan(李博, 华灯鑫, 周艳). Acta Optica Sinica(光学学报), 2017, 37(4): 0428003.
- [12] Hardy R L. J. Geophys. Res., 1971, 76: 1905.
- [13] HE Bin, HUANG Yuan, CHEN Liang(何斌, 黄渊, 陈亮). Plateau Meteorology(高原气象), 2014, 33(1): 171.
- [14] LI Bo, ZHAO Si-xiong, LU Han-cheng(李博, 赵思雄, 陆汉城). Journal of Applied Meteorological Science(应用气象学报), 2008, 19(3): 307.

表 1 同化前后雨量模拟效果定量分析  
Table 1 Quantitative analysis of precipitation before and after data assimilating

6 h 雨强 /mm	评分指标	一次同化前	一次同化后 二次同化前	一次同化效果	二次同化后	二次同化效果
	TS	0.59	0.66	0.07	0.71	0.05
0.1~5	空报率	0.13	0.17	0.04	0.09	-0.08
	漏报率	0.28	0.19	-0.09	0.19	0

## 3 结论

引入激光雷达开展降雨外围探测实验, 并利用自主研发的 10 标定方程反演新算法对温度进行反演。通过三步实验完成了雷达测温数据在 WRF 中的同化方法研究。对模拟效果开展评估表明, 利用 MQ 给 WRF 模式加入雷达测温数据后可较好优化模式初始场, 并对短时强降雨模拟效果产生积极改善。与常规温度廓线相比, 激光雷达温度廓线具有较高垂直分辨率, 该类数据包含了更精细的“温度层结”结构, 这些信息会对模式计算及大气结构模拟产生独特改进, 特别是对同等高度段内大气参数产生明显改变, 并最终造成模拟效果提升。

致谢: 感谢中科院大气物理研究所赵亮博士、西安理工大学高鹤明博士、石冬晨博士对文章的修改建议。

# A Method for Assimilating the Raman Lidar Detecting Temperature in WRF on Simulating the Short-Time Heavy Rainfall

LI Bo<sup>1,2</sup>, PU Ya-zhou<sup>1</sup>, WANG Nan<sup>3</sup>, WANG Yu-feng<sup>1</sup>, DI Hui-ge<sup>1</sup>, SONG Yue-hui<sup>1</sup>, HUA Deng-xin<sup>1\*</sup>

1. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

2. Institute of Tropical and Marine Meteorology/Guangdong Provincial Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080, China

3. The Meteorological Observatory of Shaanxi Province, Xi'an 710014, China

**Abstract** In order to take full advantage of Raman lidar, a high-resolution detecting experiment was carried out at the periphery of the convective cloud, and a temperature with a vertical resolution of 4 m was inverted by using the synthetically multilevel quality analysis and control technique. Three groups of experiments were conducted, and a novel method for assimilating the lidar detecting temperature was especially proposed based on the coupling between the Multiquadric method and WRFDA (the Weather Research and Forecasting model Data Assimilation system). Firstly, a controlled experiment (CTRL) was carried out, and the suitable model parameters were obtained after debugging model. Secondly, based on the WRFDA module, the conventional observational data, including ground station and radiosonde station were integrated into the initial field. The results showed that TS increased by 0.07, and the dummy precipitation in southwest Shaanxi was successfully avoided. Thirdly, the Multiquadric method was used to assimilate Lidar data. TS increased by 0.12, and the Miss hit forecast rate was reduced by 0.09. When the lidar data was integrated into the WRF model, the positive simulation effects could be obtained according to quantitative and qualitative analysis. It was also discovered that the variation of simulation precipitation was because of the change of elements, including wind, water vapor, and temperature. Lidar could be well used to detect short-time heavy rainfall, according to this study.

**Keywords** The lidar detecting temperature; Short-time heavy rainfall; Multiquadric method

(Received Apr. 2, 2019; accepted Oct. 14, 2019)

\* Corresponding author